

ORIGINAL ARTICLE

저서환경에서 이산화탄소 노출에 따른 국내산 해산무척추동물 요각류(*Tisbe sp.*)와 단각류(*Monocorophium acherusicum*)의 만성영향

문성대^{1,2)} · 최태섭^{1)*} · 성찬경^{1,3)} · 이정석¹⁾ · 박영규⁴⁾ · 강성길⁵⁾

¹⁾(주)네오엔비즈 환경안전연구소, ²⁾충남대학교 생명시스템과학대학 생물과학과

³⁾서울시립대학교 에너지환경시스템공학과, ⁴⁾한국해양과학기술원 해양순환기후연구부

⁵⁾한국해양과학기술원 해양시스템안전연구소

Chronic Effect Exposed to Carbon Dioxide in Benthic Environment with Marine Invertebrates Copepod(*Tisbe sp.*) and Amphipod (*Monocorophium acherusicum*)

Seong-Dae Moon^{1,2)}, Tae Seob Choi^{1)*}, Chan-Gyoung Sung^{1,3)}, Jung-Suk Lee¹⁾,
Young-Gyu Park⁴⁾, Seong-Gil Kang⁵⁾

¹⁾Institute of Environmental Protection and Safety, NeoEnBiz Co., Bucheon 420-806, Korea

²⁾Department of Biological Science, School of Biological Sciences and Biotechnology, Chungnam National University,
Daejeon 305-764, Korea

³⁾Department of Energy and Environmental System Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

⁴⁾Ocean Circulation and Climate Research Division, Korea Institute of Ocean Science and Technology(KIOST), Ansan
426-744, Korea

⁵⁾Maritime and Ocean Engineering Research Institute(MOERI)/Korea Institute of Ocean Science and Technology
(KIOST), Daejeon 305-343, Korea

Abstract

Chronic effects such as reproduction and population dynamics with elevated CO₂ concentration were evaluated using two representative marine benthic species, copepod (*Tisbe sp.*) and amphipod (*Monocorophium acherusicum*) adopting long-term exposure. Juvenile copepod and amphipod individuals were cultivated in the seawater equilibrated with control air (0.395 mmol CO₂/air mol) and high CO₂ air having 0.998, to 3.03, 10.3, and 30.1 mmol CO₂/air mol during 20 and 46 days, respectively. After the exposure period, the number of benthic invertebrate was counted with separate larval and juvenile stage such as naupliar, copepodid and adult for copepod, or neonate and adult for amphipod, respectively. The individual number of both test species at each life-stage was significantly decreased in seawater with 10.3 mmol CO₂/air mol or higher. Recently, the technology of marine CO₂ sequestration has been developed for the reduction of CO₂ emission, which may cause climate change. However, under various scenarios of CO₂ leaks during the injection process or sequestered CO₂ in marine geological structure,

Received 25 January, 2013; Revised 26 March, 2013;

Accepted 27 March, 2013

*Corresponding author : Tae Seob Choi, Institute of Environmental Protection and Safety, NeoEnBiz Co., Bucheon, 420-806, Korea
Phone: +82-10-4626-7195
E-mail: tschoi@neoenbiz.com

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

the potential risk to organism including various invertebrates can be expected to exposure. So the results of this study suggested that the detailed consideration on the adverse effect with marine ecosystem can be prerequisite for the marine CO₂ sequestration projects.

Key words : Carbon dioxide, Chronic effect, Marine invertebrate, Benthic environment, Risk assessment

1. 서론

화석연료의 사용과 산림 및 연안 생태계 훼손 등 인간 활동으로 인하여 대기 중의 이산화탄소(CO₂) 농도는 산업혁명 이후 빠르게 증가하고 있다. 현재의 증가 추세가 지속된다면 현재 약 380 μatm 인 이산화탄소 농도는 21세기 말에는 1000 μatm 으로 약 3배 정도 증가될 것으로 예측되어 이에 따른 기후변화 문제는 이미 심각한 인류의 재앙으로서 받아들여지고 있다(IPCC, 2007). 지금까지는 주로 지구 표면 온도의 상승, 이른바 ‘지구온난화’가 기후변화 문제의 핵심적인 주제였으나, 최근 증가된 이산화탄소가 지표면의 70% 가량을 덮고 있는 해양 표층의 pH를 지속적으로 낮추고 있다는 것이 알려지면서 소위 ‘해양산성화’ 현상에 대한 관심이 증가하고 있는 실정이다. 실제로 2100년에 이르면 해양 표면의 pH가 현재보다 0.3~0.4 또는 그 이상 낮아질 수 있다는 예측이 나오면서 이에 따른 해양 생태계의 피해 영향에 대한 연구의 필요성이 증가하고 있다(Orr 등, 2005; IPCC, 2007; Fabry 등, 2008; Doney 등, 2009).

대기에서 해수로 유입된 CO₂는 가수분해 과정을 통해 용존 무기탄소(용존 이산화탄소, 탄산염, 중탄산염 이온 등)와 수소이온 농도를 변화시키게 된다(Sabine 등, 2004). 이 과정에서 해수의 용존 무기탄소나 수소 이온의 농도가 변화하게 되면 해양의 많은 생물들, 특히 탄산염을 이용하여 골격을 형성하는 산호류, 이매패류, 극피동물, 갑각류 등이 성장에 영향을 받을 수 있고, 다른 종류의 해양생물 역시 체내 산-염기 균형의 파괴로 인해 효소 기능이나 대사 등에 영향을 받을 수 있어 해양 생태계 전반적으로 큰 변화가 예상되고 있다(Kleypas 등, 1999; Royal Society, 2005).

해수에서 용존 CO₂ 농도 증가는 그 자체로도 해양 생물에 영향을 줄 수 있다는 연구 역시 보고되고 있으며(Ishimatsu 등, 2005; Basallote 등, 2012), 이는 수소

이온(H⁺)과 달리 무극성인 CO₂ 분자가 체내에서 세포막을 바로 통과하여 세포질의 pH를 낮출 수 있기 때문이다(Pörtner 등, 2004). 이처럼 해양으로 유입되는 CO₂가 증가하게 되면, 수소 이온의 증가와 함께 다양한 용존 무기탄소 성분의 변화를 통해 해양 생태계와 생물들이 저해 영향을 받을 것으로 예상할 수 있다(Pörtner, 2008). 이와 같은 영향을 정량적으로 파악하기 위하여 다양한 해양 생물을 CO₂를 이용하여 산성화한 해수에 노출한 이후 생태독성학적 영향을 파악하는 연구가 최근 활발하게 이루어지고 있다(Kurihara 등, 2004a; Whiteley, 2011).

최근에는 대기로 배출되는 이산화탄소의 양을 저감하기 위한 방안의 하나로 탄소 포집 및 격리(carbon capture and sequestration; 이하 CCS) 사업이 제안되어 국내·외에서 활발하게 연구되고 있다(IPCC, 2005; IEA, 2009). 이 사업은 대량 배출원에서 포집된 CO₂를 압축, 수송한 다음 지층에 주입하여 격리함으로써 대기 중 이산화탄소의 농도 증가를 완화하는 것을 목적으로 한다. 육상이나 해양의 깊은 지층의 불투수층 아래 공극률이 높은 층을 저장지로 활용할 수 있는데, 인구밀도가 높고 국토가 협소한 국내의 실정을 고려할 때, 해저 지층을 최종 저장지로 활용하는 것이 보다 설득력을 얻고 있다(Haszeldine, 2009).

경제적 측면에서 뿐만 아니라 환경적인 측면에서도 사업 과정이나 주입이 이루어진 이후 저장지에서 CO₂가 누출되지 않도록 감시하고 관리하는 것은 매우 중요하다. 뿐만 아니라 사업과정 그리고 이후 저장지 주변 해양 생태계가 어떤 피해 영향을 받을 수 있는지에 대한 예측과 모니터링 역시 위해성 평가의 관점에서 매우 중요하다 할 수 있다.

대기의 이산화탄소농도 증가를 저감시키는 데 있어서 이산화탄소 포집 및 지중저장 기술이 기여할 수 있을 것으로 평가받고 있음에도 불구하고, 이러한 기술이 갖는 잠재적인 위협요소로서 지중저장된 이산화

탄소의 누출이 갖는 생태계 위해에 대한 우려가 상존하고 있다. 지중저장된 이산화탄소의 누출은 기술적으로 완전히 밀봉되지 않은 주입공 또는 가스투수가 가능한(gas-permeable) 자연적인 지질 단층 등을 통한 가스상 이산화탄소의 누출(Annunziatellis 등, 2008) 등 다양한 시나리오를 예측할 수 있다. 그리고 주입과정 중에 발생할 수 있는 누출 또한 우려할 만한 부분이다.

하지만 지금까지 대부분의 해양 산성화 관련 연구는 대기 중 CO₂ 유입으로 인해 직접 영향을 받게 되는 해양 표층의 생물들을 이용하여 주로 이루어져 왔기 때문에 사업과정 또는 이후 누출된 CO₂에 의한 해양 생태계, 특히 저서환경에 서식하는 생물들에게 어떤 영향을 미칠 수 있는지에 대한 연구는 많이 이루어지지 못하고 있다 (Langenbuch와 Portner, 2004; Basallote 등, 2012). 뿐만 아니라 기존의 연구는 단기간 동안 생물 개체 수준에서 생존, 성장 또는 생리적 영향을 파악하는 경우가 대부분이었다. 이와 같은 개체 수준의 연구결과는 CO₂의 농도 수준에 따른 생물의 반응을 정량하기에는 적합하지만, 현장 조건에서처럼 장기간 동안 CO₂에 노출된 개체군이나 군집 수준의 생태독성학적 영향을 예측하는 데에 활용하기는 어려운 제한을 가지고 있다.

향후 CCS를 위한 해양 지중저장 사업이 본격적으로 이루어지기 위해서는 사업으로 인해 영향을 받을 수 있는 해양 생태계의 변화, 특히 저서 생태계에 대한 위해성 예측이 매우 중요하다. 이를 위해서는 국내 연안 저서환경에 서식하는 주요 생물종 그리고 생태계에 대한 영향을 체계적으로 파악하기 위한 연구의 필요성이 크다고 할 수 있다.

본 연구에서는 해양지중저장된 이산화탄소가 다양한 이유로 누출될 가능성이 있으며, 누출이 발생한다면 가장 먼저 영향을 받을 수 있는 저서환경에 서식하는 생물을 대상으로 이산화탄소의 영향을 평가하고자 하였다. 따라서 시험생물로 저서생태계 서식생물인 단각류(amphipod)와 요각류(copepod)를 이용하여 만성영향인 생식 및 개체군 변화를 평가하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

해양지중저장된 이산화탄소의 누출을 가정하여 고

농도의 이산화탄소에 노출된 저서무척추동물의 생식과 개체군생태 영향을 평가하기 위하여 저서성 요각류(*Tisbe sp.*, copepod)와 단각류(*Monocorophium acherusicum*, amphipod)를 시험종으로 이용하였다. 요각류와 단각류 같은 저서생물의 특성을 고려하여 실험용기의 바닥에 퇴적물을 깔고 시험생물을 노출하였다.

저서성 요각류와 단각류는 오염된 퇴적물에 대한 생물학적 저해영향 평가에 널리 활용되는 생물이다 (Thomas 등, 2003; USEPA, 1994; Simpson과 Spadaro, 2011). 요각류는 퇴적물 속이나 표면에서 서식하는 Harpacticoida 목에 속하는 중형동물(meiofauna)로서 크기가 매우 작고 생활사가 10~15일 정도로 짧아 생식실험이나 개체군 실험에 적당한 시험생물이다. 또한 단각류는 오염퇴적물에 대한 민감도가 뛰어나 국내에서 퇴적물 독성시험에 이용되는 표준 시험종으로 이용되고 있다.

2.1. 실험재료

실험을 위한 장치의 구성은 이산화탄소 혼합가스, 내부에 여과기가 장치되어있는 50-L 용량의 폭기조, CO₂생물영향실험장치, 우수분배장치, 노출배양실험조 그리고 수질측정조로 구성되었다(Fig. 1). 폭기조는 이산화탄소 가스를 연속적으로 폭기하여 해수 중에 녹아들어 평형상태에 이르도록 하였다. CO₂ 생물영향실험장치는 유속계를 이용하여 일정한 속도로 이산화탄소 가스로 폭기된 해수가 노출용기에 흘러갈

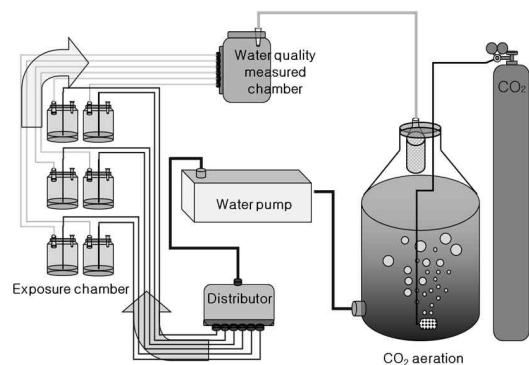


Fig. 1. A set of experimental equipment consisting of 5 parts (aerator for CO₂ aeration, water pump, distributor, CO₂ exposure chamber, and temporary chamber for checking water quality) for CO₂ exposure of marine benthic invertebrate.

수 있도록 고안되었다. 노출실험배양조는 폴리에틸렌 수지 재질의 뚜껑이 있는 550 mL 크기의 유리용기를 사용하였으며, 뚜껑에는 입수구와 먹이급이구 그리고 63 μm 의 나일론 미세망사가 부착된 출수구가 장치되어 있다. 마지막으로 수질측정조는 입의 개폐가 가능한 뚜껑을 장착하여 규칙적인 수질 측정 및 관리에 이용되었다(Fig. 2). 실험장치는 이산화탄소 농도별로 준비하여 실험하였다. 미리 농도가 조제된 이산화탄소 혼합가스를 450 cc/min의 양으로 연속적으로 폭기하였으며, 수질측정조에서 계획된 노출수준에 도달하는가를 확인하기 위하여 연속적으로 pH를 측정하여 확인하였다.

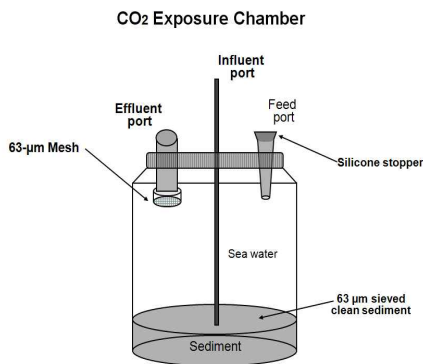


Fig. 2. Detailed structure of CO₂ exposure chamber for marine benthic invertebrate.

2.2. 실험방법

해수 중 용존 이산화탄소 농도의 증가가 퇴적물에서 서식하는 저서무척추동물의 개체군 생태에 미치는 영향을 평가하기 위하여 다양한 농도구배의 이산화탄소를 준비하고 저서환경에 노출시키기 위한 실험장치를 고안하여 실험하였다. 이산화탄소의 농도구배는 대기 중 일반적으로 나타나는 0.395 mmol CO₂/air mol (약 0.04%; 이하 대조구) (Gentzis, 2000) 농도를 대조구

로 이용하였고, 0.998 (약 0.1%; 이하 X3 실험구), 3.03 (약 0.3%; 이하 X10 실험구), 10.3 (약 1%; 이하 X30 실험구), 30.1 mmol CO₂/air mol (약 3%; 이하 X100 실험구)의 농도구배를 실험구로 하여 비교하였다. 이산화탄소의 농도구배 설정은 대조구를 기준으로 약 3배 정도씩 증가하는 구배로 설정하였다. 이산화탄소는 산소, 질소, 아르곤이 포함된 혼합가스를 이용하였고, 이산화탄소 가스는 가스제조업체로부터 농도가 확인된 가스를 구매하여 사용하였다. 이산화탄소의 농도구배는 직접 측정하지 않았으며, 수질측정조에 pH를 측정하여 농도구배를 확인하였다 (Table 1).

실험에 이용한 해산저서무척추동물은 (주)네오엔비즈 환경안전연구소에서 상시 배양중인 저서성 요각류와 단각류를 이용하였다. 요각류는 태어난 지 24시간 미만, 크기는 100 μm 내외의 개체(nauplius 유생)를 이용하였고, 단각류는 355~500 μm 크기의 개체(일령 약 5-10일)를 이용하였다. 각 생물들은 해부현미경 하에서 계수하여 요각류 10개체, 단각류 20개체를 이산화탄소 농도별 실험구에 투입하였다. 이산화탄소 노출농도별 반복은 요각류 4개, 단각류 3개로 하였다.

실험에 이용된 해수는 인천 영흥도에 위치한 인천시립종묘배양장에서 여과해수를 채수하여 실험실로 옮겨온 후 재여과하여 사용하였다. 실험구 바닥에 실험생물을 위한 기질을 깔아주었으며, 기질로 이용한 퇴적물은 인천광역시 영종도에서 채취한 조건대 퇴적물로서 내서생물 제거를 위하여 63 μm 표준체를 통과시켜 준비하였다. 전처리한 기질을 노출용기 바닥에 두께가 약 1 cm 정도 되도록 깔아주었다.

요각류는 각 이산화탄소 농도별 실험구에 20일간 노출하였으며 단각류는 46일간 노출하였다. 노출을 종료한 후에 노출배양실험조 내부의 해수와 기질을

Table 1. pH value of overlying water in various ranges of dissolved CO₂ concentrations for 20-d sediment toxicity tests

Treatment	CO ₂ Concentration (mmol/air mol)	pH					
		Initial	1 week	2 week	Final	Average	S.D
Control	0.395	7.97	8.01	7.99	7.99	7.99	0.02
X3	0.998	7.72	7.63	7.62	7.70	7.67	0.05
X10	3.03	7.40	7.25	7.30	7.35	7.33	0.06
X30	10.3	6.97	6.81	6.79	6.95	6.88	0.09
X100	30.1	6.59	6.55	6.64	6.65	6.61	0.05

전량 63- μ m 미세망사를 통과시켜 생물만을 수거하였다. 요각류의 경우 생활사 단계(nauplius, copepodid, adult) 그리고 단각류는 어린개체(neonate)와 성체로 구분하여 계수하였다.

노출 중에 요각류와 단각류의 먹이로는 액상의 테트라민 (TetraMin[®])을 1주일에 1 mL의 양으로 급이하였고, YCT(U.S. EPA, 2002)는 1주일에 300 μ L씩 급이하였다. 그리고 노출실험 후반부에 먹이주입량을 2배 증가시켜 급이하였다.

먹이 급이시기에 맞춰 50-L 폭기조의 해수는 주당 1회 25 L씩 1시간 가량의 실험장치를 일시 정지시키고 환수하였다. 먹이급이 시에만 약 1시간 정도 CO₂ 생물영향실험장치의 가동만을 중단하였고 농도별 이산화탄소 (CO₂) 가스의 폭기는 계속 유지하였다.

2.3. 자료의 분석

이산화탄소 농도구배에 따른 요각류와 단각류의 생식 및 개체군 영향을 확인하기 위하여 SPSS 프로그램(ver. 10.0)을 이용하여 자료를 분석하였다. 이산화탄소 농도구배에 대한 영향과 생물의 발생단계별 차

이의 통계적 유의성을 검증하기 위하여 일원배치 분산분석(one-way ANOVA)을 수행하였다. 대조구 및 개별 실험구 간의 유의성 검증은 다중비교(multiple comparison) 방법인 Duncan test를 수행하였으며, 모든 분석의 유의수준은 0.05였다.

3. 결과

3.1. 해수의 pH

이산화탄소 농도구배별 실험의 시작, 매주 그리고 종료 시 각각의 농도마다 pH를 측정하였다. 그 결과 이산화탄소 농도가 높아질수록 해수의 pH가 낮아지는 경향을 확인할 수 있었다(Table 1). 배양을 시작하면서 측정한 pH는 배양 과정과 종료 시점까지 유의한 변화가 없었다. 실험기간 동안 주기적으로 측정된 해수의 염분은 실험구간에 차이가 없었으며, 평균 31.8 \pm 2.0 psu이었다.

3.2. 저서성 요각류에 대한 영향

이산화탄소 농도구배에 저서성 요각류를 20일 동안 노출하고, 살아있는 개체를 발생단계별로 구분하

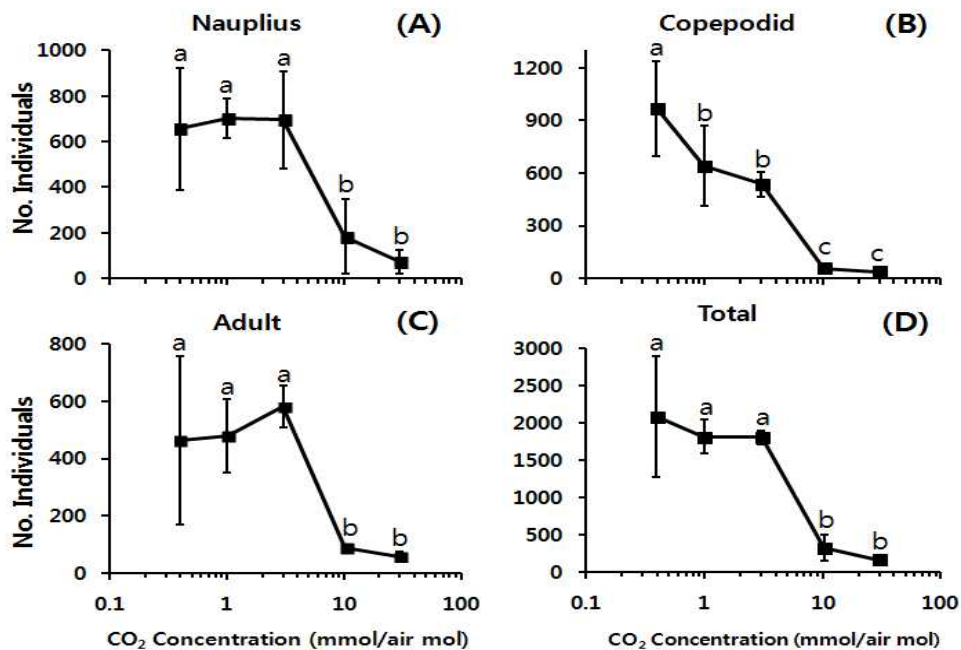


Fig. 3. Number of individuals of *Tisbe sp.* exposed to various ranges of dissolved CO₂ concentrations in seawater. Error bars indicate standard deviations (N=4). Values with the same character showed no significance (ANOVA, $p > 0.05$).

여 계수하였다. 대기 중 이산화탄소 농도 수준인 대조구(0.395 mmol CO₂/air mol, 0.04 %)에서 Naupliar와 copepodid 유생, adult의 평균 개체수는 총 2088±807 마리로 20일간의 배양기간 동안 약 200배 가량 증가한 것으로 나타났다(Fig. 3). 또한 X3과 X10 실험구에서도 개체수가 약 180배 가량 증가한 결과를 보였고, 통계적으로 대조구와 유의한 차이는 없었다. 하지만 X30과 X100 실험구에서는 최종 평균 개체수가 각각 328±172, 168±48 마리로 대조구에 비하여 유의하게 적었다(Fig. 3). 모든 생활사 단계의 요각류는 Duncan test 결과 X30과 X100 실험구에서 개체수가 유의하게 적은 것으로 나타나 10.3 mmol CO₂/air mol 이상의 농도가 요각류의 번식에 부정적인 영향을 주었음을 알 수 있었다. 특징적으로 Copepodid 단계의 경우 0.998과 3.03 mmol CO₂/air mol 조건에서도 대조구에 비해 유의하게 적은 개체수를 보였다(Fig. 3).

배양 실험 종료 시점에서 요각류 세 가지 생활사 단계의 개체수와 총 개체수에 대한 이산화탄소 농도의 영향은 분산분석(ANOVA) 결과 유의한 것으로 나타났다(Table 2).

3.3. 저서성 단각류에 대한 영향

저서성 단각류를 이산화탄소 농도구배에 46일 동안 노출하고, 노출을 종료한 후 어린 개체(neonate)와 성체(adult)로 구분하여 계수하였다. 대조구에서 어린 개체와 성체의 평균 개체수는 각각 103±15.7, 18±1.0 개체였으며, 단각류의 성장주기를 고려해 볼 때, 최종 시점에서의 성체는 대부분 시험 시작시 넣어주었던 개체들로 판단된다.

단각류 성체의 수는 X30 실험구에서만 유의하게 감소하였고, 나머지 실험구는 대조구와 유의한 차이를 보이지 않았다(Fig. 4). 하지만 단각류 어린 개체의 평균 개체수는 이산화탄소 농도가 10.3 mmol CO₂/air mol 이상인 경우 유의하게 감소하는 경향을 보였다(Fig. 4). 단각류 어린 개체와 성체의 합산 개체수도 어린 개체의 개체수와 유사한 경향을 보였다.

배양 실험 종료 시점에서 단각류의 두 가지 생활사 단계의 개체수와 총 개체수에 대한 이산화탄소 농도의 영향은 분산분석(ANOVA) 결과 유의한 것으로 나타났다(Table 3).

Table 2. Summary of the analysis variance (ANOVA) for the test parameter of *Tisbe* sp. at the end of exposure to various concentration of CO₂

Test parameter	Condition	Sum of Squares	df	Mean Square	F value	Probability
Naupliar	Between Groups	1.5E+06	4	3.8E+05	12.31	.000
	Total	2.0E+06	19			
Copepodid	Between Groups	2.5E+06	4	6.3E+05	24.14	.000
	Total	2.9E+06	19			
Adult	Between Groups	9.4E+05	4	2.4E+05	10.88	.000
	Total	1.3E+06	19			
Total	Between Groups	1.3E+07	4	3.4E+06	22.68	.000
	Total	1.6E+07	19			

Table 3. Summary of the analysis variance (ANOVA) for the test parameter of *M. achrusicum* at the end of exposure to various concentration of CO₂

Test parameter	Condition	Sum of Squares	df	Mean Square	F value	Probability
Neonate	Between Groups	2.2E+04	4	5.4E+03	6.97	.006
	Total	2.9E+04	14			
Adult	Between Groups	9.1E+01	4	2.3E+01	6.44	.008
	Total	1.3E+02	14			
Total	Between Groups	2.4E+04	4	6.0E+03	7.77	.004
	Total	3.2E+04	14			

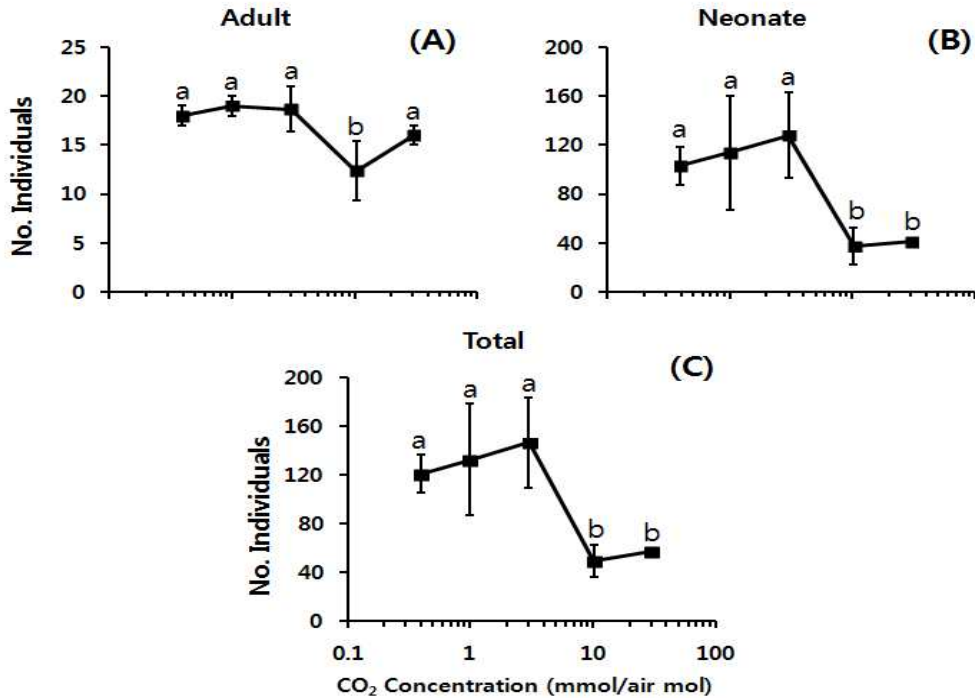


Fig. 4. Number of individuals of *M. acherusicum* exposed to various ranges of dissolved CO₂ concentrations in seawater. Error bars indicate standard deviations (N=3). Values with the same character showed no significance (ANOVA, $p > 0.05$).

4. 고찰

해수의 pH는 유입되는 이산화탄소의 농도에 비례하여 감소하였다. 이러한 경향은 흔히 이산화탄소에 의한 해수의 ‘산성화(acidification)’라고 하는데, 해수와 평형을 이룬 대기 중 이산화탄소가 대기 중의 3~100 배 증가 시에 해수의 pH는 0.32에서 1.38까지 감소하는 것으로 보고되고 있다(Zeebe와 Wolf-Gladrow, 2001; Caldeira와 Wickett, 2003). 이와 같은 이산화탄소 증가에 따른 해수의 화학적인 변화는 해양생물에 대해 생리, 생화학적 영향을 미칠 수 있어 최근 많은 연구자들의 관심을 받고 있다(Whiteley, 2011).

본 연구에서는 대기 중 농도의 3~300배에 달하는 고농도의 이산화탄소가 해수에 장기간 유입되었을 경우에 대표적인 저서생물인 요각류와 단각류의 개체군 성장에 어떤 영향을 미칠 수 있는지에 대해 파악하였다. 대기 중 농도(대조구)의 3~10배에 해당하는 이산화탄소 농도에 평형을 이룬 해수 아래 퇴적물에서 서식

하는 요각류와 단각류는 각각 20일 또는 46일간의 배양 이후 총 개체수에서 대조구와 유의한 차이를 보이지 않았다. 하지만, 대조구 이산화탄소 농도의 30~100 배에 해당하는 실험구는 최종 개체수가 두 시험 중 모두 크게 감소한 결과를 보였다. 따라서 상기 농도 이상의 이산화탄소가 해양에 장기간 유입될 경우 해양 저서생태계는 심각한 피해를 입을 수 있을 것으로 추측된다.

이산화탄소는 고농도로 해양에 유입되면 pH를 낮추고 탄산염 농도를 변화시켜 일부 해양 생물에게 저해 영향을 미칠 수 있는 것으로 알려져 있다(Kleypas 등, 2006; Feely 등, 2004). 이에 따라 많은 연구진들이 대기 중 이산화탄소 증가가 다양한 해양 생물에 미치는 영향에 대해 연구해 왔다. 최근 탄산염 골격을 이루고 있는 생물군 중에서 성게, 이매패류 등의 발달이나 유생의 성장, 생식에 대한 이산화탄소 농도 증가의 영향은 매우 민감하여 현재 수준의 농도보다 50~100% 정도 증가한 경우에도 유의한 변화가 나타날 수 있는

것으로 보고되기도 하였다(Kurihara와 Shirayama, 2004a,b; Miles 등, 2007; Gazeau 등, 2007; Havenhand 등, 2008). 하지만 현재 수준보다 수 배에서 수십 배 또는 그 이상 이산화탄소의 농도가 증가한 경우에도 유의한 영향이 나타나지 않는 경우도 본 연구에서와 마찬가지로 종종 보고되고 있다(Kurihara와 Shirayama, 2004a,b; Green 등, 2004). 이처럼 해양 생물에 대한 산성화의 영향은 생물 종류와 생활사 단계, 그리고 서식 환경 특성에 따라서 다르게 나타날 수 있고, 같은 생물 종류에서도 농도증가의 속도나 적응 기간에 따라서 영향에 차이가 있다고 보여진다.

지금까지의 산성화 연구는 대기 중 이산화탄소 농도 변화에 따른 해양 생물의 반응을 보는 것에 목적을 두었기 때문에 주로 해수에 서식하는 생물들에 대한 낮은 수준의 이산화탄소 농도 증가가 미치는 영향 평가에 중점을 두고 이루어져왔다(Michaelidis 등, 2005; Kurihara 등, 2007; Kurihara, 2008). 하지만 해저지중 저장 과정에서 유출된 이산화탄소의 해양 생태계에 대한 영향을 평가하기 위해서는 상대적으로 고농도의 이산화탄소가 특히 저서환경에 장기간 유입할 경우 나타날 수 있는 생물의 반응에 대해서 보다 면밀히 살펴볼 필요가 있다. 대부분의 연구가 대기 중 이산화탄소 농도 증가로 인한 영향에 초점을 맞추어 이루어져왔기 때문에 현재까지 저서환경에 미칠 수 있는 산성화 영향에 대해서는 충분히 많은 연구가 진행되지 않은 실정이다.

요각류에 대한 고농도의 이산화탄소 영향에 대한 연구는 주로 부유성 요각류인 *Acartia* 속의 생물종에 대해서 이루어져 왔다(Kurihara, 2008). 이산화탄소의 *Acartia erythraea*와 *A. steueri*에 대한 영향 연구에서 Kurihara 등(2004a)은 약 1%의 대기 중 이산화탄소와 평형을 이룬 해수에서도 시험생물 성체의 생존율이 대조구와 차이를 보이지 않음을 보고하였다. 반면 Kurihara 등(2004b)의 연구에서는 *A. erythraea*의 유생은 약 0.2%의 이산화탄소 하에서는 생존율의 변화가 없었지만, 0.5%에서는 유의한 영향을 보고하였다. 또한 Kurihara와 Ishimatsu(2008)은 0.24%의 이산화탄소 대기 하에서 9일간 노출된 *A. tsuensis*의 발생, 성장, 생존에 아무런 영향을 미치지 않음을 보고한 바 있다. 다른 종에 대한 연구로는 Mayor 등 (2007)이 수행

한 *Calanus finmarchicus*의 성장과 생식에 대한 이산화탄소의 영향 연구를 들 수 있는데, 이 연구에서 저자들은 0.8%의 이산화탄소 농도의 대기 하에서 성장과 난 생산에 대한 영향은 없었지만, 부화율에는 유의한 영향을 확인한 바 있다. 저서성 요각류인 *Tisbe* sp.를 이용한 본 연구에서 약 0.3% 이하에서는 대조구와 유의한 차이를 보이지 않는 무영향농도(NOEC)가 관찰되어 상기의 다른 부유성 요각류에 대한 실험 결과와 유사한 것으로 나타나 요각류의 이산화탄소 민감성은 종이나 서식 특성에 따른 차이는 크지 않은 것으로 판단된다.

실험실 조건에서 고농도의 이산화탄소 조건하에서 장기간 배양된 저서성 단각류의 생존 및 성장에 대한 연구결과는 본 연구를 제외하면 매우 드물다. Egilsdottir 등(2009)이 단각류인 *Echinogammarus marinus*에 대해 이산화탄소 영향을 연구한 결과에서는 염분에 따라 다소 상반되는 결과를 얻었는데, 35 psu 해수에서는 약 0.19%의 이산화탄소 조건에서 부화한 개체수가 대조구(0.04%)에 비해 다소 높았지만, 22 psu 해수에서는 반대의 경향을 보이는 결과를 보고하였다. 하지만 두 결과 모두 통계적인 유의성은 없는 결과로 이산화탄소가 미치는 단각류의 부화율에 대한 영향은 0.19% 조건에서 명확하게 파악되지는 못하였다. 또 다른 단각류 *Gammarus locusta*에 대한 연구에서는 최대 0.1%의 이산화탄소 조건에서 생존, 성장과 함께 분자생물학적 연구를 수행하였는데(Hauton 등, 2009), 비록 생존, 성장과 같은 개체 수준에서의 유의한 영향은 관찰되지 않았으나, 대사에 관련된 특정 유전자의 발현에 0.1%의 이산화탄소 조건이 매우 미약하지만 통계적으로 유의한 관련성이 있는 것으로 나타났다. 이러한 영향은 산성화로 인한 스트레스에 대응하는 세포 이하 수준의 대사과정과 관련되는 것으로 본 연구진의 다른 연구에서 수행한 어류의 세포에너지할당(cellular energy allocation; CEA)에 대한 CO₂의 영향 연구에서도 유사한 결과를 확인할 수 있었다(Moon 등, 2013).

대기 중 이산화탄소 농도는 인류가 아무런 대책도 마련하지 않는다는 IPCC의 최악의 시나리오 하에서도 2100년까지 현재의 3배 정도 증가하는 것으로 예측되고 있다(IPCC, 2007). 본 연구의 시험생물에 대

한 심각한 영향이 나타났던 현재의 30배 이상 농도의 이산화탄소가 해양으로 유입되는 상황이 대기 중 이산화탄소 농도 증가로 인해 전 지구적인 규모로 나타나기는 어려울 것으로 판단된다. 하지만 매우 특수한 조건, 예를 들면 이산화탄소의 해저지중 저장과정에서의 유출과 같은 조건에서는 그와 같은 고농도의 이산화탄소 유입이 충분히 가능할 것으로 판단된다. 따라서 유출된 이산화탄소가 직접 영향을 미칠 수 있는 저서생태계에 대한 고농도의 용존 이산화탄소의 영향과 저서생물의 이산화탄소에 대한 민감성에 대한 연구는 보다 체계적으로 다양한 생물에 대하여 이루어질 필요가 있다(Basallote 등, 2012).

5. 결론

본 연구에서는 거의 최초로 퇴적물과 함께 배양된 조건에서 요각류와 단각류의 개체군 성장을 반영하는 장기간 노출 조건에서 이산화탄소의 영향을 규명하였다. 본 연구에서 저서성 요각류와 단각류 시험종은 모두 0.3% 이하의 조건에서 대조구와 최종 개체수의 차이가 나타나지 않았으며, 1% 이상의 조건에서는 최종 개체수가 크게 감소하여 이들 생물종의 생존과 생식에 매우 심각한 저해 영향을 미쳤음을 알 수 있었다. 이와 같은 실험 결과는 저서환경에 서식하는 주요 생물군의 이산화탄소 민감성 분포 파악과, 향후 다양한 생물 영향 연구 결과에 근거한 생태학적 안전 기준 도출에 활용될 수 있을 것이다.

현재 전 세계적으로 활발하게 수행되고 있는 다양한 이산화탄소 포집 및 저장 사업은 2050년까지 그 규모가 꾸준히 증가할 것으로 판단된다(Global CCS Institute, 2011). 국내에서도 동해의 남부 해역에 포집된 이산화탄소를 저장하는 사업의 타당성에 대해 연구 중이며 실제 사업이 진행된다면 연간 100만에서 1억톤 정도의 이산화탄소 배출을 해저지중 저장을 통해 감소시키려는 계획을 검토하고 있다(Kang과 Huh, 2011). 따라서 대량의 이산화탄소를 운송, 주입, 저장하는 각 단계에서 잠재적으로 발생할 수 있는 이산화탄소 누출의 해양 생태계 영향에 대해서 예측하고 평가하는 것은 매우 중요하고, 보다 정확한 예측을 위해서는 아직까지도 다양한 연구 결과가 매우 부족한 실

정이다. 실제 해양지중 저장사업이 진행되는 과정에서 지역특이적 환경위해성평가에 활용될 수 있는 생태영향 데이터베이스의 구축을 위해서는 해당 사업이 이루어지는 해역의 생태계 영향을 파악할 수 있는 충분한 현장조사와 생물을 이용한 실험실 연구가 수행될 필요가 있다.

감사의 글

본 논문은 국토해양부 연구개발사업으로 한국해양과학기술원에서 수행중인 “이산화탄소 해양지중저장 기술개발”사업의 지원을 받아 수행한 연구결과입니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- Annunziatellis, A., Beaubien, S. E., Bigi, S., Ciotoli, G., Coltella, M., Lombardi, S., 2008, Gas migration along fault systems and through the vadose zone in the Lateral caldera (central Italy): Implications for CO₂ geological storage, *Int. J. Greenh. Gas Con.*, 2, 353-372.
- Basallote, M. D., Rodriguez-Romero, A., Blasco, J., DelValls, A., Riba, I., 2012, Lethal effects on different marine organisms, associated with sediment? seawater acidification deriving from CO₂ leakage, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 19, 2550-2560.
- Caldeira, K., Wickett, M. E., 2003, Anthropogenic carbon and ocean pH, *Nature*, 425, 365p.
- Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., Kleypas, J. A., 2009, Ocean Acidification: The other CO₂ problem, *Annu. Rev. Mar. Sci.*, 1, 169-192.
- Egilsdottir, H., Spicer, J. I., Rundle, S. D., 2009, The effect of CO₂ acidified seawater and reduced salinity on aspects of the embryonic development of the amphipod *Echinogammarus marinus* (Leach), *Mar. Pollut. Bull.*, 58, 1187-1191.
- Fabry, V. J., Seibel, B. A., Feely, R. A., Orr, J. C., 2008, Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes, *ICES J. of Mar. Sci.*, 65, 414-432.
- Feely, R. A., Sabine, C. L., Lee, K., Berelson, W., Kleypas, J., Fabry, V. J., Millero, F. J., 2004, Impact of anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ system in the

- oceans, *Science*, 305, 362-366.
- Gazeau, F., Quiblier, C., Jansen, J. M., Gattuso, J. P., Middelburg, J. J., Heip, C. H. R., 2007, Impact of elevated CO₂ on shellfish calcification, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L07603.
- Gentz, T., 2000, Subsurface sequestration of carbon dioxide: an overview from an Alberta (Canada) perspective, *Int. J. of Coal Geo.*, 43, 287-305.
- Global CCS Institute, 2011, The global status of CCS: 2011, Canberra, Australia.
- Green, M. A., Jones, M. E., Boudreau, C. L., Moore, R. L., Westman, B. A., 2004, Dissolution mortality of juvenile bivalves in coastal marine deposits, *Limnol. Oceanogr.*, 49, 727-734.
- Haszeldine R. S., 2009, Carbon Capture and Storage: How Green Can Black Be?, *Science*, 325, 1647-1652.
- Hauton, C., Tyrrell, T., Williams, J., 2009, The subtle effects of sea water acidification on the amphipod *Gammarus locusta*, *Biogeosciences*, 6, 1479-1489.
- Havenhand, J. N., Buttler, F. R., Thorndyke, M. C., Williamson, J. E., 2008, Near-future levels of ocean acidification reduce fertilization success in a sea urchin, *Curr. Biol.*, 18, R651-R652.
- IEA, 2009, Technology Roadmap - Carbon capture and storage, International Energy Agency, Paris.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2005, Carbon Dioxide Capture and Storage, IPCC Special Report, Cambridge University Press, New York.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007, Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Ishimatsu, A., Hayashi, M., Lee, K. S., Kikkawa, T., Kita, J., 2005, Physiological effects on fishes in a high-CO₂ world, *J. Geophys. Res.*, 110, C09S09.
- Kang, S. G., Huh, C., 2011, Current status of marine CCS technology and commercialization plan in the future, Proceedings of the Korean Society for Marine Environmental Engineering Conference, 177p.
- Kleypas, J. A., Buddemeier, R. W., Archer, D., Gattuso, J. P., Langdon, C., Opdyke, B. N., 1999, Geochemical Consequences of Increased Atmospheric Carbon Dioxide on Coral Reefs, *Science*, 284, 118-120.
- Kleypas, J. A., Feely, R. A., Fabry, V. J., Langdon, C., Sabine, C. L., Robbins, L. L., 2006, Impacts of ocean acidification on coral reefs and other marine calcifiers: a guide for future research, Report of a workshop held on 18-20 April 2005, St. Petersburg, FL, sponsored by NSF, NOAA, and the U.S. Geological Survey.
- Kurihara, H., 2008, Effects of CO₂-driven ocean acidification on the early developmental stages of invertebrates, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 373, 275-284.
- Kurihara, H., Ishimatsu, A., 2008, Effects of elevated CO₂ on the life cycle of copepod *Acartia tsuensis*, *Mar. Pollut. Bull.*, 56, 1086-1090.
- Kurihara, H., Kato, S., Ishimatsu, A., 2007, Effects of increased seawater pCO₂ on the early development of the oyster *Crassostrea gigas*, *Aquatic Biology*, 1, 91-98.
- Kurihara, H., Shimode, S., Shirayama, Y., 2004a, Sublethal effects of elevated concentration of CO₂ on planktonic copepods and sea urchins, *J. Oceanogr.*, 60, 743-750.
- Kurihara, H., Shimode, S., Shirayama, Y., 2004b, Effects of raised CO₂ concentration on the egg production rate and early development of two marine copepods (*Acartia steueri* and *Acartia erythraea*), *Mar. Pollut. Bull.*, 49, 721-727.
- Kurihara, H., Shirayama, Y., 2004a, Effects of increased atmospheric CO₂ on sea urchin early development, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 274, 161-169.
- Kurihara, H., Shirayama, Y., 2004b, Effects of increased atmospheric CO₂ and decreased pH on sea urchin embryos and gametes, In: Heinzeller, T., Nebelsick, J. H., (eds) Echinoderms. Proceedings of the 11th International Echinoderm Conference. AA Balkema Publishers, Leiden, 31-36pp.
- Langenbuch, M., Pörtner, H. O., 2004, High sensitivity to chronically elevated CO₂ levels in a eurybathic marine sipunculid, *Aquat. Toxicol.*, 70, 55-61.
- Mayor, D. J., Matthews, C., Cook, K., Zuur, A. F., Hay, S., 2007, CO₂-induced acidification affects hatching success in *Calanus finmarchicus*, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 350, 91-97.
- Michaelidis, B., Ouzounis, C., Paleras, A., Pörtner, H.

- O., 2005, Effects of long-term moderate hypercapnia on acid-base balance and growth rate in marine mussels *Mytilus galloprovincialis*, Mar. Ecol. Prog. Ser., 293, 109-118.
- Miles, H., Widdicombe, S., Spicer, J. I., Hall-Spencer, J., 2007, Effects of anthropogenic seawater acidification on acid-base balance in the sea urchin *Psammechinus miliaris*, Mar. Pollut. Bull. 54, 89-96.
- Moon, S. D., Lee, J. H., Sung, C. G., Choi, T. S., Lee, K. T., Lee, J. S., Kang, S. G., 2013, Cellular energy allocation of polychaete(*Perinereis aibuhitensis*) exposed to dissolved carbon dioxide in seawater, J. Korean Mar. Environ. Eng., 16, 9-16.
- Orr, J. C., Fabry, V. J., Aumont, O., Bopp, L., Doney, S. C., Feely, R. A., Gnanadesikan, A., Gruber, N., Ishida, A., Joos, F., Key, R. M., Lindsay, K., Maier-Reimer, E., Matear, R., Monfray, P., Mouchet, A., Najjar, R. G., Plattner, G. K., Rodgers, K. B., Sabine, C. L., Sarmiento, J. L., Schlitzer, R., Slater, R. D., Totterdell, I. J., Weirig, M. F., Yamanaka, Y., Yool, A., 2005, Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms, Nature, 437, 681-686.
- Pörtner, H. O., 2008, Ecosystem effects of ocean acidification in times of ocean warming: a physiologist's view. Mar. Ecol. Prog. Ser., 373, 203-217.
- Pörtner, H. O., Langenbuch, M., Reipschläger, A., 2004, Biological impact of elevated ocean CO₂ concentrations: lessons from animal physiology and earth history, J. of Oceanogr., 60, 705-718.
- Royal Society, 2005, Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide, Policy Document 12/05, The Royal Society, London.
- Sabine, C. L., Feely, R. A., Gruber, N., Key R. M., Lee K., Bullister J. L., Wanninkhof R., Wong C. S., Wallace D. W. R., Tilbrook B., Millero F. J., Peng T-H., Kozyr A., Ono T., Rios A. F., 2004, The Oceanic Sink for Anthropogenic CO₂, Science, 305, 367-371.
- Simpson, S. L., Spadaro, D. A., 2011, Performance and sensitivity of rapid sublethal sediment toxicity tests with the amphipod *Melita plumulosa* and copepod *Nitocra spinipes*, Env. Toxicol. Chem., 30, 2326-2334.
- Thomas, K. V., Barnard, N., Collins, K., Eggleton, J., 2003, Toxicity characterization of sediment porewaters collected from UK estuaries using a *Tisbe battagliai* bioassay, Chemosphere, 53, 1105-1111.
- USEPA, 1994, Methods for assessing the toxicity of sediment-associated contaminants with estuarine and marine amphipods, EPA 600/R-94/025.
- Whiteley, N. M., 2011, Physiological and ecological responses of crustaceans to ocean acidification, Mar. Ecol. Prog. Ser., 430, 257-271.
- Zeebe, R. E., Wolf-Gladrow, D., 2001, CO₂ in seawater: equilibrium, kinetics, isotopes. In: Halpern D (ed) Elsevier oceanography series, Series 65. Elsevier, Amsterdam.